

Feature-Baukasten für FDM-Druckverfahren

Franz Wieck, Tim Katzwinkel und Manuel Löwer

Die additive Fertigungstechnologie hat in den vergangenen Jahren durch kostengünstige Systeme Einzug in den Massen- und Consumer-Markt erhalten. Diese Entwicklung befähigte die sogenannte Maker-Szene, eine Gruppierung von Heimwerkern mit Bezügen zur Hacker- und Do-it-yourself-Kultur, kostengünstig und schnell Produktideen in Funktionsprototypen umzusetzen. Neben der reinen Hobbyanwendung bietet die Entwicklung der letzten Jahre aus Sicht der Produktentwicklung auch neue Chancen für die Strategie des *Open Design*.

Demgegenüber steht das Problem der unterschiedlichsten Bildungs- und Ausbildungshintergründe der sich freiwillig beteiligenden Entwickler, eine stark iterative Vorgehensweise in der Produktentwicklung mit häufigen Anpassungszyklen und vielen physischen Teilprototypen, sowie einer lokal sehr unterschiedlichen qualitativen Fertigungsinfrastruktur. Diese Umstände führen derzeit zu einer schwankenden Qualitätsgüte der Ergebnisse und stellen gerade im Hinblick auf die Produktsicherheit eine immense Herausforderung dar.

Aus den genannten Gründen soll die Maker-Szene mit Hilfe des vorliegenden Beitrags zur Erzeugung funktional abgesicherter Geometriemodelle befähigt werden.

1 Einleitung

Aus der Freien-Software-Bewegung der 1980er Jahre etablierte sich 1998 der Begriff *Open Source* als Bezeichnung für Software, deren Quelltext öffentlich eingesehen, genutzt und geändert werden darf (Open 2018a). Der Grundgedanke des freien, gemeinsamen Entwickelns von Technologie beschränkte

sich seitdem nicht nur auf die Softwareentwicklung, sondern fand auch in der Entwicklung sogenannter Open-Source-Hardware sowie Kombinationen aus Hard- und Software Anwendung. Ein prominentes Beispiel für eine solche Kombination ist die in der Maker-Szene weit verbreitete, Arduino-Entwicklerplattform, bei der sowohl die Elektronik als auch die Steuerungssoftware unter dem *Open Source* Paradigma entwickelt und bereitgestellt wird (Arduino 2019).

Während Software- und Hardware-Entwicklung vor allem domänenspezifische Teilaspekte eines funktionalen Gegenstands bzw. eines Produkts adressieren, hat sich in den letzten Jahren die Bezeichnung *Open Design* für die domänenübergreifende Entwicklung von Produkten nach dem Open Source Prinzip etabliert. Der Begriff *Open Design* ist derzeit nicht einheitlich definiert und wird von verschiedenen Autoren unterschiedlich gedeutet (Open 2018, Kadushin 2019, Balka 2009).

Im Rahmen dieses Beitrags wird der Begriff daher wie folgt definiert:

Open Design ist ein Paradigma freier und gemeinschaftlicher Entwicklung funktionaler Produktkonzepte unter Zuhilfenahme von Rapid Prototyping Technologien, bei dem im gesamten Prozess alle Informationen für alle Beteiligten jederzeit frei zugänglich sind.

2 Stand der Technik und Forschung

Die Denkansätze von *Open Source* und *Open Design* haben sich in den letzten Jahrzehnten, vor allem aufgrund der globalen Kommunikationsmöglichkeiten mit Hilfe des Internets, zu globalen Phänomenen entwickelt. So verzeichnet beispielsweise die seit 10 Jahren betriebene Internetplattform Thingiverse, eine Online-Datenbank mit frei herunterladbaren 3D-Druck-Vorlagen, im Jahr 2018 über 2,3 Millionen registrierte Nutzer und stellt insgesamt über 3 Millionen herunterladbare Objekte zur Verfügung (Leighton 2018). Das Teilen und Diskutieren eines Produktkonzepts innerhalb solcher Entwicklergemeinschaften ist ein typisches Charakteristikum des *Open Design* (von Hippel 2005).

Derzeit sind *Open Design* Projekte stark von iterativen Entwicklungsprozessen geprägt. Über Internetplattformen wie Thingiverse, Pinshape oder Fabster

stehen Entwürfe allen Interessierten zum Nachdrucken und zur Überarbeiten zur Verfügung. Daraus resultiert eine sehr hohe potentielle Innovationskraft innerhalb der Maker-Szene und darüber hinaus. Andererseits stammen die beteiligten (Hobby-) Entwickler oft aus ganz verschiedenen Schichten der Gesellschaft und haben divergente Bildungs- und Ausbildungshintergründe. Bei internationalen Entwicklungsprojekten kommen unterschiedliche Sprachen und kulturelle Unterschiede hinzu.

Erschwerend kommt hinzu, dass die technische Ausstattung der Fertigungseinrichtungen je nach Modell und Hersteller sowie verwendetem Material bei gleicher digitaler Ausgangsgeometrie qualitativ unterschiedliche physische Ergebnisse liefert.

2.1 *Open Design* im Kontext der Produktentwicklung

Anders als die reine *Open Source* Softwareentwicklung beinhaltet das Phänomen *Open Design* einen auf multiple Domänen (z.B. mechanische Konstruktion, Elektrotechnik, Steuerungs-Programmierung, Produktionstechnik usw.) verteilten Produktentwicklungsprozess (Balka 2009). Es ist nachvollziehbar, dass hieraus ein vergleichsweise erhöhter Abstimmungsaufwand und erheblich mehr Fehlerpotentiale resultieren. Zudem stehen die Entwickler gewöhnlich in keiner wirtschaftlichen Abhängigkeit zum Entwicklungsprojekt. Sie sind zudem in keiner eindeutigen Hierarchie zueinander gebunden, wodurch sich inhomogene, unstete Projektverläufe und die Ausgründung parallel entwickelter Konzeptvarianten ergeben können (Balka 2009, OSE 2018).

Die Diversität von *Open Design* spiegelt sich nicht nur im Entwicklungsprozess selbst, sondern ebenso im Produktkontext wieder. Dieser reicht von reinen Dekorationsobjekten aus dem Hobbybereich über die prototypische Entwicklung innovativer, funktionaler Produktideen bis zur Weiterentwicklung von bereits im Markt befindlichen technischen Produkten (Forest 2016, Rosa 2017). Darüber hinaus nutzen Unternehmen *Open Design* auch innerhalb ihrer Strategien zur Öffnung des Innovationsprozesses, der *Open Innovation* (Wien 2017).

Unter Zuhilfenahme sogenannter Finanzierungsplattformen schließlich bietet *Open Design* freien Entwicklern die Chance, innovative Konzeptideen zu marktfähigen Produkten zu entwickeln und mit einer eigenen Geschäftsidee

Start-Up-Unternehmen zu gründen (Howard 2012). Somit kann *Open Design* durch Innovationskraft und Technologievorsprung auch zum nachhaltigen Wirtschaftswachstum beitragen.

Besondere Herausforderungen von *Open Design* sind derzeit in der Produktsicherheit und der Produkthaftung zu sehen, was unter anderem auf die global verteilte und teilweise anonyme Entwicklergemeinde sowie die unterschiedlich erzielte lokale Fertigungsqualität der Erzeugnisse zurückgeführt werden kann (Oberneyer 2018, Schmauder 2018).

2.2 Additive Fertigung im *Open Design*

Die Anfertigung und Erprobung von physischen Prototypen ist ein wichtiger Bestandteil der im Rahmen dieses Beitrags adressierten *Open Design* Projekte. Hierfür werden bevorzugt kostengünstige Fertigungsmöglichkeiten verwendet, die zudem einen möglichst hohen Freiheitsgrad an Gestaltungsmöglichkeiten bieten sollten. Aus diesem Grund ist die additive Fertigung im Kontext von *Open Design* ein in der Maker-Szene häufig genutztes Fertigungsverfahren. Das FDM-Verfahren war die weltweit meistgenutzte 3D-Druck-Technologie im Jahr 2018 (Sculpteo 2018). Ein Beleg hierfür ist auch die bereits vorgestellte Internetplattform Thingiverse (vgl. Einleitung Kapitel 2), deren Objekte explizit für den 3D-Druck mittels FDM-Verfahren vorgesehen sind.

Neben dem FDM Druckverfahren finden im *Open Design* aber auch andere Verfahrensvarianten des Rapid-Prototyping wie beispielsweise die (Laser-) Stereolithographie oder farbige Pulver-Binder-Verfahren Anwendung. Die Verfahrenswahl ist unter anderem abhängig von der lokalen Infrastruktur (z.B. Platz am Aufstellort), dem zu verarbeitenden Material (z.B. flexible Elastomere), der benötigten Genauigkeit und nicht zuletzt auch dem verfügbaren Budget. Für eine genaue Beschreibung der benannten Verfahren und ihrer spezifischen Eigenschaften sei an dieser Stelle auf die Fachliteratur verwiesen (Gebhardt 2016).

Hier besteht eine weitere große Herausforderung von *Open Design* Projekten. Üblicherweise werden auf den benannten Internetplattformen wie Thingiverse oder Pinshape Dateien im STL-Format bereitgestellt, nur in Ausnahmefällen ist ebenfalls eine 3D-CAD-Datei verfügbar. Die spezifischen Prozessparameter werden typischerweise für einen bestimmten Druckertyp in Form einer expliziten Druckereinstellung vorgegeben. Informationen zur ingenieurmäßigen Auslegung eines Bauteils, etwa ertragbare Lasten für verschiedene Größenskalierungen der Geometrie, fehlen aber meist vollständig. Zudem fehlen Informationen zum Zusammenhang der Prozessparameter und der mechanischen Eigenschaften des Bauteils. So kann eine Veränderung der Schichthöhe und der Schichtorientierung die Zugfestigkeit und die Elastizität des Bauteils beeinflussen (Tymrak 2014). Ebenso beeinflussen das verwendete Material und dessen Additive die Bauteileigenschaften (Wittbrodt 2015). Weitere Einflussgrößen sind beispielsweise die Rasterorientierung, der Luftspalt, die Sickenbreite oder die Drucktemperatur (Ahn 2002).

2.4 Handlungsbedarf

Aufgrund der in Kapitel 2.3 dargestellten Beschränkungen in der Datenverarbeitung und der mangelnden Bereitstellung ingenieurwissenschaftlicher Auslegungskriterien sind *Open Design* Projekte derzeit durch stark iterative, experimentelle Vorgehensweisen bei der Prototypen-Erzeugung geprägt. Dabei werden Vorarbeiten anderer Entwickler zwar häufig wiederverwendet, die tatsächliche mechanische Auslegung und Qualitätsabsicherung der Druckergebnisse wird jedoch auf Basis des eigenen Erfahrungswissens von jedem Anwender für jeden Druck neu durchgeführt. Die Folge sind individuell angepasste Gestaltvarianten innovativer Produktkonzepte, die nicht ohne Weiteres im Sinne des *Open Design* Paradigmas von der Entwickler-Community weiterverwendet werden können.

Funktionssicherheit und Erzeugnisqualität der bereitgestellten Inhalte von Internetplattformen wie Thingiverse, Pinshape oder Fabster sind derzeit wesentlich vom Fachwissen des Druckenden abhängig. Andererseits ist ein Charakteristikum der *Open Design* Community eben gerade die Diversität des Ausbildungsstands und fachlichen Hintergrundwissens. Unwissenheit und „Herumprobieren“ kostet Zeit und birgt potentiell Gefahren für Entwickler und Anwender. Auch die wiederkehrenden Lernkurven bei der Ermittlung

der richtigen Prozessparameter hemmt den effektiven Einsatz des *Open Design* Paradigmas, dem freien Teilen von Technologiewissen zum gegenseitigen Nutzen. Dabei bietet die etablierte Infrastruktur (Internetplattformen, Entwickler-Communities, freie Softwaretools usw.) prinzipiell bereits die Möglichkeit zum Wissensaustausch und zur Qualitätssicherung.

Im Rahmen dieses Beitrags wird daher eine Methode zur Sicherung von Qualität und Funktion im Kontext von *Open Design* vorgeschlagen. Aufbauend auf den Ansätzen der Feature-Technologie und mit der Bereitstellung externalisierten Fachwissens soll damit die technische Qualität von Produktkonzepten und die Sicherheit für Entwickler und Anwender im *Open Design* gestärkt werden.

3 Methode

Ziel der hier vorgestellten Methode ist es, der Open-Design-Community eine Rahmenstruktur für die Bereitstellung zusätzlicher, sicherheits- und auslegungstechnisch relevanter Informationen bereitzustellen. Die konsequente Anwendung der Methode in der Community soll die Qualität der *Open Design* Projekte durch den Einsatz vordefinierter, ingenieurmäßig ausgelegter und geprüfter Gestaltfeature verbessern. Im Sinne der Definition des Featurebegriffs nach VDI 2218 wird innerhalb der Methode eine Aggregation von Geometrieelementen und Semantik im Sinne einer Repräsentation von Hintergrundwissen für den in Kapitel 2 geschilderten Kontext von *Open Design* Projekten behandelt (VDI 2218).

Damit ein Bauteil seine konstruktive Funktion sicher erfüllen kann, sind bei der Fertigung technische Anforderungen an die Gestalt des Erzeugnisses einzuhalten. Typische Anforderungen sind etwa Oberflächengüte, mechanische Festigkeit oder ausreichende Steifigkeit. Diese Anforderungen werden geometrisch durch Wirkflächen erfüllt. Packmaße, Radien, Formschrägen und Überhänge sind typische Geometrien. Damit das Bauteil hergestellt werden kann, müssen darüber hinaus ebenfalls Prozessparameter festgelegt werden. Beispiele hierfür sind etwa Druckrichtung, Drucktemperatur, verwendetes Material, Düsendurchmesser, etc. Zusammengefasst bestehen also geometrische, funktionale und prozessuale Anforderungen an ein 3D-gedrucktes Bauteil.

Diejenigen Anforderungen, die sich geometrisch eindeutig einem lokalen Bauteilbereich zuordnen lassen und die, bezogen auf das restliche Bauteil, zudem funktionale Autonomie besitzen, lassen sich zu Feature-Elementen im Sinne der VDI 2218 zusammenfassen. Mit Hilfe der Feature-Technologie kann dann bereits erarbeitetes Konstruktionswissen informationstechnisch gebündelt und wiederverwendet werden. Um dabei eine möglichst generische Anwendbarkeit zu gewährleisten, wird im Rahmen dieses Beitrags daher ein modularer Baukasten für die Erzeugung eines gedruckten Bauteils mittels FDM-Technologie vorgeschlagen, vgl. Abbildung 2.

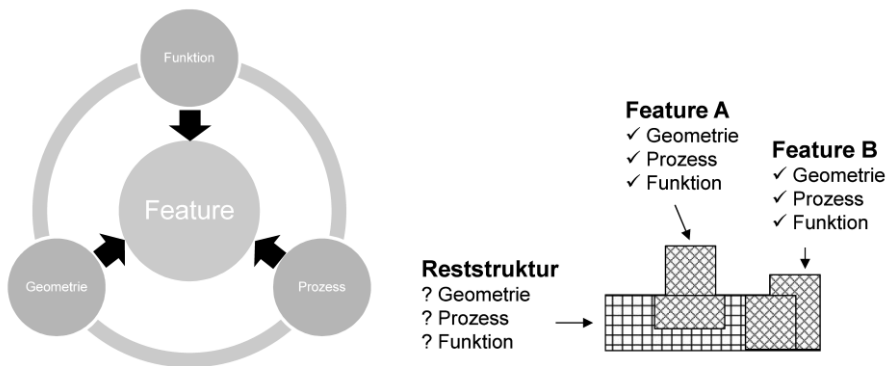


Abbildung 2: Feature-Technologie in der additiven Fertigung

Die Anwendung der Feature-Technologie hat sich in modernen, parametrischen 3D-CAD-Systemen bereits seit Jahrzehnten zur Effizienzsteigerung und Qualitätssicherung des Konstruktionsprozesses bewährt. Im Kontext des FDM-Drucks bieten solche Feature die Möglichkeit, ingenieurmäßig ausgelegte und abgesicherte Teilstrukturen für das *Open Design* bereitzustellen. Dies steigert die Produktsicherheit der Erzeugnisse und minimiert die Fehlerpotentiale einer *Open Design* Entwicklung vor dem Hintergrund der in Kapitel 2.3 beschriebenen Dilemmata. Diese geometrisch und prozessual erprobten Teilstrukturen werden zudem durch funktionales Auslegungswissen ergänzt, womit der Informationsgehalt des modularen Feature-Katalogs maximiert wird, vgl. Abbildung 3.

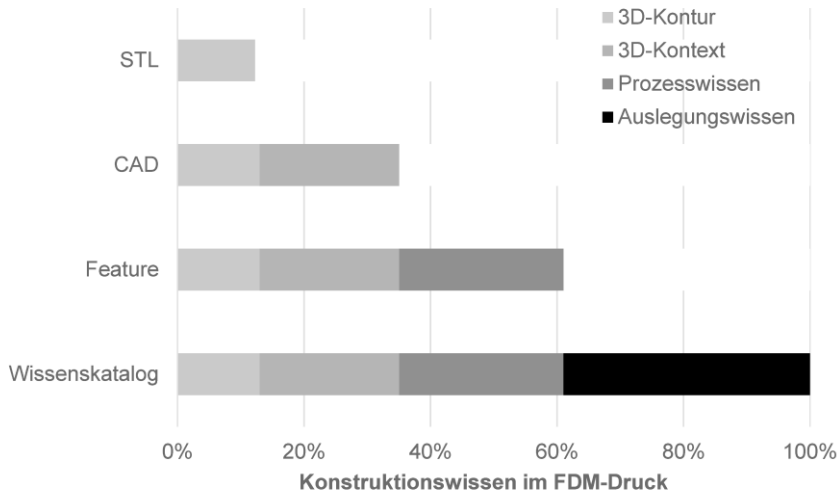


Abbildung 3: Maximieren des Informationsgehalts durch Wissenskatalog

In Kapitel 4 wird die beschriebene Methode anhand eines typischen Konstruktionsbeispiels einer Welle-Nabe-Verbindung (WNV) exemplarisch demonstriert.

4 Anwendungsbeispiel

Die Polygonwellenverbindungen nach DIN 32711 bzw. DIN 32712 sind im Maschinenbau häufig verwendete Maschinenelemente. Ihre Vorteile sind unter anderem eine geringe Kerbwirkung, Selbstzentrierung, Übertragung großer Drehmomente, hohe Laufruhe, einfache Montage und ein geringer Bau- raum (Steinhilper 2008, S. 529-536). Die Hauptfunktion dieser formschlüssigen WNV ohne Verbindungselemente ist die Drehmomentübertragung.

Die genannten Eigenschaften machen diese WNV zu einem attraktiven Lösungselement für Fragestellungen zur mechanischen Momentenübertragung in *Open Design* Projekten. Insbesondere die hohen Fertigungskosten solcher Gleichdicke werden im FDM-Verfahren radikal minimiert. Die Geometrie des P3G-Profiles der Polygonwellenverbindung nach DIN 32711 ist durch die kontinuierliche und krümmungsstetige Kontur für FDM-Drucker sogar im besonderen Maße geeignet, da der harmonische Übergang der

Flanken­geometrie zur Ecke keine abrupten Richtungswechsel des Druckkopfes oder eine Unterbrechung des Filamentflusses innerhalb einer Layerebene erfordert.

Trotz der geschilderten Umstände sind derzeit keine Druckvorlagen oder Auslegungshilfen für eine Verwendung in *Open Design* Projekten verfügbar. Im Sinne der in Kapitel 3 vorgestellten Methode wird daher in den folgenden Abschnitten das Feature „Polygonwellenverbindung“ für die Anwendung im FDM-Druck erarbeitet.

4.1 Mechanische und geometrische Eigenschaften

Als Auslegungskriterien für die beiden genormten Polygonprofile P3G und P4C definiert die Norm die anliegende Torsionsspannung, die anliegende Biegespannung, die Flächenpressung in den Kontaktflächen sowie die kleinste Nabenwanddicke (DIN 32711-2, DIN 32712-2). Die Auslegungsmodelle der Normung beziehen sich auf die Elastizitätsgrenze $R_{p0,2}$ des verwendeten Werkstoffs für Welle bzw. Nabe (DIN 32711-2, DIN 32712-2). Bei der Drehmomentübertragung bilden sich drei (P3G-Profil) bzw. vier (P4C-Profil) Kontaktzonen auf der Fügefläche aus, vgl. Abbildung 4 (Steinhilper 2008). Nur über diese Zonen können Momente übertragen werden. Der Anteil der Normalspannungen ist bei der Übertragung der Momente wesentlich größer als die durch Reibung verursachten Schubspannungen (ebenda).

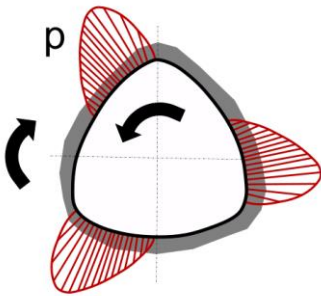


Abbildung 4: Spannungsverlauf am P3G-Profil nach (Steinhilper 2008)

Das Polygonprofil beider Typen leitet sich gemäß der Normung aus sogenannten Polygonkurven ab, deren Verläufe für 31 Toleranzfelder mit Wellendurchmessern von $d_{\min} = 14 \text{ mm}$ bis $d_{\max} = 180 \text{ mm}$ tabellarisch

vorgeschrieben sind (DIN 32711-1, DIN 32712-1). Die Tabelle beinhaltet ebenfalls die Tolerierung entsprechender Maßabweichungen. Mit den Angaben der Norm lässt sich ein parametrisches 3D-CAD-Modell anfertigen.

4.2 Adaption der Polygonwellenverbindung auf den FDM Prozess

Für die Übertragung der benannten Normen auf den 3D-Druck mit dem FDM-Verfahren ergeben sich schon bei der rechnerischen Auslegung Schwierigkeiten. So stellt die 0,2%-Dehngrenze keinen typischen Werkstoffwert des FDM-Drucks dar, da diese nicht nur vom gewählten Filament, sondern ebenfalls von Wandschichtstärke und Füllgrad der Zwischenräume (engl. „Infill“) abhängt.

Überträgt man die Polygonkurven und die daraus resultierenden Wellen- bzw. Nabengeometrien im STL-Format in eine Slicer-Software, wird ein weiterer Unterschied zur konventionellen Fertigung mittels spanendem Materialabtrag deutlich, vgl. Abbildung 5.

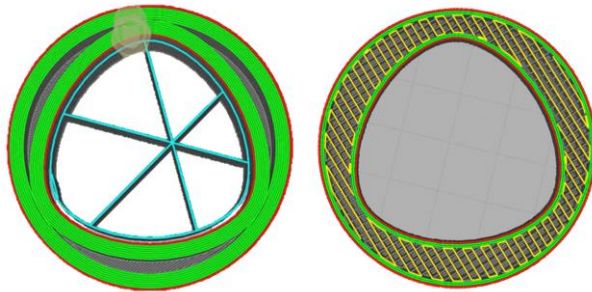


Abbildung 5: Querschnittsänderung durch die Prozessparameter Wandschichtstärke und Infill

Bei großer Wandschichtstärke und geringem Infill zeigt sich hier ein harter Übergang zwischen den kontinuierlichen Polygonkurvenzügen der Nabengeometrie und der umliegenden Reststruktur (Abbildung 5, links). Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass die Ausbildung der Hohlstellen hierbei an den Stellen höchster Normalspannungsverteilung auftritt, vgl. Abbildung 4. Hierdurch kann ein vorzeitiges Bauteilversagen eintreten. Bei Verringerung der Wandstärke und Erhöhung des Infill-Grads wird die Festigkeit der Nabengeometrie wiederum wesentlich von der Art der Infill-Struktur bestimmt (Abbildung 5, rechts). Aufgrund der gerichteten Infill-Musterung ist hier ein anisotropes Versagensverhalten zu erwarten.

Es wird deutlich, dass die Norm-Angaben nicht ohne weiteres auf den 3D-Druck mit FDM-Verfahren übertragbar sind. Dies betrifft nicht nur die prozessuale Geometrieerzeugung, sondern ebenfalls die lastgerechte Auslegung der WNV. Daher wurde die nachfolgend diskutierte empirische Versuchsreihe durchgeführt, um belastbare Prozessparameter und Gestaltungshinweise zu erarbeiten.

4.3 Prüfversuche und Auswertung

Um die mechanischen Eigenschaften der WNV im FDM-Druck verlässlich zu ermitteln, wurden empirische Untersuchungen an Probenkörper durchgeführt. Die Grundgeometrie der Probenkörper nach DIN 32711-1 wurde hierzu in einem 3D-CAD-System durch Werkzeugaufnahmen an Welle und Nabe ergänzt. Diese 3D-Volumenmodelle wurden anschließend in STL Dateien überführt und in einer Slicer-Software mit verschiedenen Füllgraden und Wandschichtdicken konfiguriert. Die Herstellung der Probenkörper erfolgte mittels des FDM-Verfahrens aus PLA-Filament, wobei die voreingestellte Drucktemperatur 200°C betrug, das Druckbett auf 60°C vorgeheizt und die Druckgeschwindigkeit auf 60 mm/s eingestellt wurde. Abschließend wurden die Probenkörper im Torsionsversuch bis zum Bauteilversagen mit einem schrittweise ansteigenden, statischen Torsionsmoment belastet.

Abbildung 6 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der Versuchsreihe für die Profilgeometrie P3G 16. Dabei stehen die repräsentativen Querschnitte 1 und 4 jeweils für die Werkzeugaufnahme des Prüfaufbaus (Sechskant-Geometrie), die Querschnitte 2 und 3 zeigen jeweils die Wellen- bzw. Nabengeometrie. Die Wandlinienschichtstärke sowie der Füll-Grad wurden systematisch variiert.

Die verwendete Geometrie der WNV mit einem Nennkreisdurchmesser von $D=16$ und einer Einspannlänge von 10mm ist der DIN 32711-1 entnommen. Der Außendurchmesser der Nabe wurde auf $D=26,2\text{mm}$ festgelegt, daraus folgt eine Wandstärke von 4,5mm bis 5,5mm.

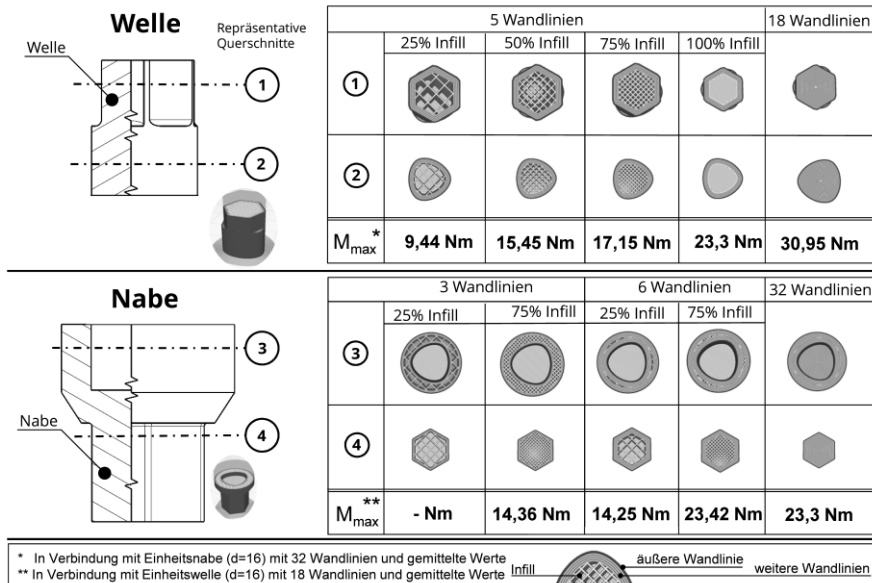


Abbildung 6: Auswertung des Torsionsversuchs für P3G 16

Durch die Versuche konnte gezeigt werden, dass eine Erhöhung des Füllgrads sowohl durch Füllmuster als auch Wandlinien eine Erhöhung des zulässigen Drehmoments der WNV zur Folge haben kann. Die genauen Werte können Abbildung 6 entnommen werden. Somit kann eine sichere Funktionserfüllung der WNV nur durch die Abstimmung des Prozesses auf die Geometrie unter Berücksichtigung der Anforderungen gewährleistet werden.

4.4 Feature Polygonwellenverbindung

Aus den empirischen Untersuchungen leitet sich ab, dass die Eigenschaften der Polygonwellenverbindung für den FDM-Druck durch die Angaben der Norm nicht ausreichend abgedeckt sind. Auf Basis der Untersuchungsergebnisse wurde daher das Feature „Polygonwellenverbindung“ als modularer Bestandteil des FDM-Feature-Baukastens neu definiert. Hierbei wird die Grundlage der geometrischen Herleitung nach Norm zwar beibehalten, jedoch um die Prozessangaben zu Infill und Wall-Thickness ergänzt. In Kombination mit der Angabe des zu erwartenden ertragbaren Torsionsmoments

wurde hiermit die Grundlage für den effektiven Einsatz dieses Features in *Open Design* Projekten geschaffen.

Der Feature-Zugang wird innerhalb des Baukasten-Konzepts einerseits auf konventionelle Art durch die Bereitstellung skalierbarer STL-Dateien realisiert. Diese reine Geometrieinformation wird zusätzlich durch den im Folgenden beschriebenen Wissenstransfer mit Hilfe eines virtuellen Konstruktionskatalogs ergänzt. Hierbei steht die Vermittlung von Auslegungswissen im Vordergrund.

4.5 Wissenstransfer

Je nach Anwendungsfall kann mit Hilfe eines einfach verständlichen, digitalen Wissenskatalogs eine für das spezifische Setting (Druckertyp, Material, funktionale Aufgabe, Bauraum und Größenordnung der Wirkung) optimal geeignete Feature –Auswahl getroffen werden. Auf diese Weise kann vermieden werden, dass eine Polygonwellenverbindung funktionale Aufgaben aufgrund falscher Auslegungskriterien nicht erfüllt oder nach kurzer Zeit Materialversagen eintritt.

Die nachstehende Abbildung 7 zeigt beispielhaft die Umsetzung des Wissenstransfers mit Hilfe einer html-Datei.

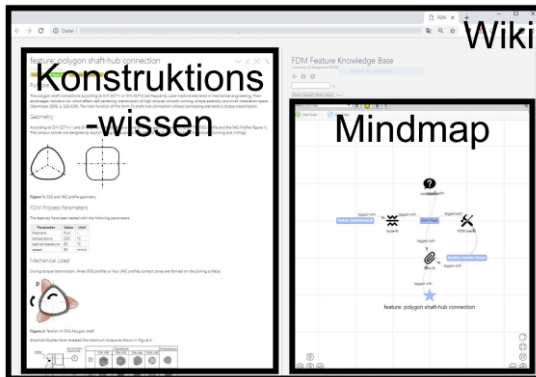


Abbildung 7: Wissenstransfer mit Hilfe eines html-Wiki

Im digitalen Konstruktionskatalog sind die Kontext- und Auslegungsinformationen der einzelnen Features in einzelnen Abschnitten hinterlegt. Der Wissens-Zugriff auf Feature-Informationen erfolgt methodisch über die Vergabe

von Stichworten (bsp. Verbindungsart, Funktion). Als Orientierungshilfe wird zusätzlich eine Mindmap mit den semantischen Verknüpfungen der Artikel eingeblendet.

5 Fazit und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde die Bedeutung von abgesichertem Wissen für die wachsende *Open Design* Community diskutiert. Hierzu wurde ein Lösungsvorschlag in Form eines FDM Feature-Baukastens vorgestellt. Anhand des Features der Polygonwellenverbindung wurden der strukturelle Aufbau und die empirische Absicherung des Katalogwissens demonstriert.

Der in Auszügen vorgestellte FDM Feature-Baukasten wird derzeit am Fachgebiet für Produktsicherheit und Qualität der Bergischen Universität Wuppertal beforscht und erprobt. Ziel ist es, einen nachhaltigen Beitrag zur Produktsicherheit und Funktionszuverlässigkeit im Bereich des *Open Design* zu leisten.

Literaturverzeichnis

- Ahn, S.-H.; Montero, M.; Odell, D.; Roundy, S.; Wright, P. K. 2002: Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. In: *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 8 Issue: 4, pp.248-257. <https://doi.org/10.1108/13552540210441166>
- Arduino Foundation 2019: What is Arduino. <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>, zuletzt abgerufen am 20.02.2019.
- Balka, K.; Raasch, C.; Herstatt, C. 2009: open source enterst he world of atoms: A statistical analysis of *open design*. In: *First Monday*, 14 (1), 248-256.
- DIN 32711-1 2009: Welle-Nabe-Verbindung, Polygonprofil P3G - Teil 1: Allgemeines und Geometrie, Berlin: Beuth Verlag.
- DIN 32711-2 2009: Welle-Nabe-Verbindung, Polygonprofil P3G - Teil 2: Berechnung und Dimensionierung, Berlin: Beuth Verlag.
- DIN 32712-1 2009: Welle-Nabe-Verbindung, Polygonprofil P4C – Teil1: Allgemeines und Geometrie, Berlin: Beuth Verlag.
- DIN 32712-2 2009: Welle-Nabe-Verbindung, Polygonprofil P4C – Teil 2: Berechnung und Dimensionierung, Berlin: Beuth Verlag.
- Forest, C.; Farzaneh, H. H.; Weinmann, J.; Lindemann, U. 2016: Quantitative Survey and Analysis of Five Maker Spaces at Large, Research-oriented Universities. In: *ASEE's 123rd Annual Conference &*

- Exposition, New Orleans, LA, 26.-29. June, American Society for Engineering Education.
<https://peer.asee.org/26023.pdf>, 25.02.2019.
- Gebhardt, A. 2016: Additive Fertigungsverfahren. Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping – Tooling – Produktion. 5. Aufl. München, Carl Hanser.
- Howard, T. J., Achiche, S., Özkil, A. G., & McAloone, T. C. 2012: *Open Design* and Crowdsourcing: Maturity, Methodology and Business Models. In: Proceedings of Design 2012 - International Design Conference, Dubrovnik, Croatia, 21.-24. May, Design Society, 181-190.
- Kadushin, R. 2018: *Open Design* Manifesto.
<https://www.ronen-kadushin.com/open-design-manifesto/>, 19.02.2019.
- Leighton, F. 2018: MakerBot Thingiverse Celebrates 10 Years of 3D Printed Things.
<https://www.businesswire.com/news/home/20181030005350/en/>, 13.2.2019.
- Oberneyer, M. K. 2018: Normadressat und Produktbegriff des ProSG im Kontext des 3D-Drucks. In: InTeR Zeitschrift zum Innovations- und Technikrecht, 2/18, 80-84.
- Open Design*+ Hardware Working Group 2018: The *Open Design* Definition v 0.5.
https://github.com/OpenDesign-WorkingGroup/Open-Design-Definition/blob/master/open.design_definition/open.design.definition.md, 19.02.2019.
- Open Source Initiative 2018a: History of the OSI.
<https://opensource.org/history>, 20.02.2019.
- OSE Open Source Ecology 2018: GVCS State of Completion.
https://wiki.opensourceecology.org/wiki/GVCS_State_of_Completion, 25.2.2019.
- Rosa, P. et al. 2017: Overview of the Maker Movement in the European Union, EUR 28686 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017, ISBN 978-92-79-70525-0, doi 10.2760/227356, JRC107298.
- Schmauder, M.; Höhn, K.; Hilgers, I.-L.; Meyer, B.; Schreiber, S. 2018: 3-D-Druck. Praxisgrundlagen zu Produktsicherheit und Rechtsrahmen. Bericht der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
doi:10.21934/baua:bericht20181106
- Sculpteo 2018: Meistgenutzte 3D-Druck-Technologien im Jahr 2018.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/760408/umfrage/meistgenutzte-3d-druck-technologie/>, 25.02.19.
- Steinhilper, W.; Sauer, B. (Hrsg.) 2008: Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1, Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag.
- Tymrak, B.M.; Kreiger, M.; Pearce, J.M. 2014: Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions, *Materials & Design*, 58, pp. 242-246. http://digitalcommons.mtu.edu/materials_fp/49

- VDI 2218, VDI-Gesellschaft Entwicklung konstruktion Vertrieb (Hrsg.) 2003: Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung. Feature-Technologie. Berlin, Beuth Verlag GmbH. ICS 03.100.40; 35.240
- Von Hippel, E. 2005: Democratizing innovation. Cambridge, MIT Press, 95-97.
- Wiener, M. 2017: Open Innovation. In: Open Foresight und Unternehmenskultur. Wiesbaden: Springer Gabler, 63-71.
- Wittbrodt, B., & Pearce, J. M. (2015). The Effects of PLA Color on Material Properties of 3-D Printed Components. Additive Manufacturing. 8, 110–116 (2015).
<http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2015.09.006>
- Zpryme Research 2016: 3D Printing comes of age in US industrial manufacturing.
<https://www.pwc.com/us/en/industrial-products/publications/assets/pwc-next-manufacturing-3d-printing-comes-of-age.pdf>, 25.02.2019.

Kontakt

Franz Wieck, M. Sc. RWTH
 Dipl.-Ing. Tim Katzwinkel
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manuel Löwer
 Bergische Universität Wuppertal
 Gaußstraße 20
 42119 Wuppertal
www.ps.uni-wuppertal.de

